

Eeva-Kaisa Snellman

# LÄÄKEAINEET PUHDISTAMOLIETTEESSÄ

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastajat: Hannele Auvinen,  
Aino-Maija Lakaniemi  
1/2020

# TIIVISTELMÄ

Eeva-Kaisa Snellman: Lääkeaineet puhdistamolietteessä  
Pharmaceuticals in sewage sludge  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristötekniikka  
1/2020

---

Lääkeaineiden ympäristövaikutuksista ollaan tultu tietoisiksi suhteellisen hiljattain, sitä on pidetty merkittävänä uhkana ympäristölle pääasiassa vasta 90-luvun loppupuolelta lähtien. Puhdistamoiden purkuvesistöihin päätyneillä lääkeaineilla on tutkitusti vaikutusta vesistön eliöihin. Tässä työssä keskitytään kuitenkin tutkimaan sitä, mitkä lääkeaineet päätyvät jätevedenpuhdistamolla lietteeseen ja miten eri lietteenkäsittelymenetelmät vaikuttavat niihin. Lietteenkäsittelymenetelmillä havaittiin olevan eroa sen suhteen, kuinka hyvin ne poistavat lääkeaineita lietteestä: Tutkituista menetelmistä kompostointi ja polttaminen poistavat lääkeaineita lietteestä tehokkaasti, mädätys ja märkähiilokäsittely puolestaan vaihtelevalla teholla.

Lääkeaineet ovat ominaisuuksiltaan toisiinsa verrattuna hyvin erilaisia. Esimerkiksi epilepsialääke karbamatsepiini on todettu olevan todella huonosti biohajoava ja muidenkin ominaisuuksiensa takia hankala poistaa jätevedestä, kun taas tulehduskipulääke parasetamolin tiedetään poistuvan jätevedenpuhdistamolla lähes täydellisesti. Jotkin tässä työssä käsitellyistä lääkeaineista adsorboituvat jätevesiprosessissa lietteeseen ja osa jää puhdistettavaan veteen. Tämä on selitettävissä osittain jakaantumiskertoimilla  $\log K_{ow}$  (oktanolin ja veden välillä) ja  $\log K_d$  (lietteen ja veden välillä).

Tässä työssä käsitellyistä lietteenkäsittelymenetelmistä toiset poistivat lietteestä lääkeaineita tehokkaammin kuin toiset. Suomessa yleisimmin käytössä olevista käsittelymenetelmistä, mädätyksestä ja kompostoinnista, kompostoinnin todettiin poistavan suhteellisen tehokkaasti lääkeaineita lietteestä. Tarkasteluun sisällytettiin mukaan näille yleisemmille käsittelymenetelmille vaihtoehtoisiksi märkähiilto ja lietteen polttaminen. Näistä kahdesta märkähiiltoprosessin lääkeaineiden poistoteho vaihtelee, kun taas polttamalla lääkeaineet psyytyään hävittämään tehokkaasti.

Lietteenkäsittelymenetelmien tehokkuus lääkeaineiden poistamisen suhteen vaihtelee. Siitä syystä menetelmiä kannattaa yhdistellä sen sijaan, että lietettä käsiteltäisiin vain yhdellä niistä, jotta päästään hyvään puhdistustehoon.

Avainsanat: Puhdistamoliete, lääkeaineet, lietteenkäsittely, hyötykäyttö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. JÄTEVESIPROSESSI JA LIETTEENKÄSITTELY .....	3
2.1 Jätevesiprosessi .....	3
2.2 Lietteenkäsittelyprosessit .....	4
3. LÄÄKEAINEIDEN OMINAISUUDET .....	9
4. LÄÄKEAINEET JÄTEVESI- JA LIETTEENKÄSITTELYPROSESSEISSA .....	13
5. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	17
LÄHTEET .....	18

# 1. JOHDANTO

Suomalaisille myytiin vuonna 2017 lääkkeitä 3,1 miljardin euron edestä ja myynti kasvoi vuodesta 2016 0,4 % (Fimea & Kela 2018). Näitä lääkeaineita ja niiden metaboliitteja päätyy jätevedenpuhdistamolle eritteiden mukana. Lääkeaineita päätyy puhdistamoille myös niiden virheellisen hävittämisen takia. (Calamari et al. 2003) Vesistöihin lääkeaineet puolestaan päätyvät jätevedenpuhdistamoiden purkuvesien mukana, sillä niistä kaikki eivät tuhoudu puhdistusprosessissa (Vieno et al. 2007). Lääkeaineet voivat päätyä purkuveden sijaan myös jätevedenpuhdistuksessa syntyvään lietteeseen (Radjenović et al. 2009a). Suomen väestö ikääntyy eli vanhusten osuus väkiluvusta kasvaa (Tilastokeskus 2018). Vanhuksilla sairaudet yleistyvät, ja joka kymmenes 75 vuotta täyttänyt suomalainen käyttääkin vähintään kymmentä eri reseptilääkettä, jotkut jopa kahtakymmentä (Fimea). Kaikki tämä yhdessä tarkoittaa sitä, että suomalaiset tulevat tulevaisuudessa käyttämään lääkkeitä yhä enenevässä määrin, jolloin kuorma ympäristössä kasvaa yhä suuremmaksi, ellei lääkejäämien päätymistä ympäristöön ehkäistä.

Lääkeaineilla tiedetään olevan monenlaisia vaikutuksia ympäristöön ja eliöihin. Esimerkiksi masennuslääkkeiden ja hormonien vaikutuksista on tutkittu laajasti. Masennuslääkkeet voivat vaikuttaa kalojen käytökseen, kuten Bisesi et al. (2014) osoittivat tutkimuksessaan, jossa altistus venlafaksiinille muutti tutkittavien kalojen aivojen serotoniinitasoa ja saalistuskäyttäytymistä. Estrogeenit tai niiden jäljitelmät, joita käytetään ehkäisyvalmisteissa, vaikuttavat puolestaan kalojen lisääntymiseen. Ontariossa Kanadassa tehty tutkimus osoitti, että jatkuva altistus pienelle pitoisuudelle ( $5-6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ )  $17\alpha$ -etinyyliestradiolia johti koiraiden feminisaatioon ja vaikutti naaraiden sukusolujen tuottoon paksupäämutujen populaatiossa (Kidd et al. 2007). Lopputuloksena paksupäämudut hävisivät järvestä lähes kokonaan.

Lääkeaineiden ympäristövaikutukset on aiheena ajankohtainen, sillä lääkkeitä on pidetty merkittävänä haitta-aineryhmänä vasta varsin lyhyen aikaa. Hughes et al. (2013) mukaan niihin on kiinnitetty huomiota 90-luvun loppupuolelta lähtien, lukuun ottamatta muutamia urauurtavia tutkimuksia 70- ja 80-luvuilla. Lääkeaineiden esiintymistä vesistöissä selvitetään EU:ssa, mutta poistovaatimuksia lääkeaineille Suomen lainsäädännössä ei vielä kuitenkaan ole. (Suomen ympäristökeskus 2017)

Lääkeaineiden haittoihin on viime aikoina havahduttu ja aihe nouseekin esiin uutisissa tasaisin väliajoin (Törmänen 2017, Pöntinen 2018, Rautiainen 2018, Väisänen 2019).

Tässä työssä tarkastellaan sitä, mitkä lääkeaineet päätyvät jätevedenpuhdistuksessa lietteeseen, ja miten ne tulee ottaa huomioon lietteen myöhemmässä hyödyntämisessä. Työssä eritellään ne lääkeaineet, jotka päätyvät puhdistamalla lietteeseen, ja perehdytään siihen, miten erilaiset lietteenkäsittelymenetelmät vaikuttavat niihin. Puhdistamolietettä voidaan käyttää esimerkiksi maanparannuksessa. Lisäksi sitä voidaan käyttää muun muassa lannoitteena maanviljelyssä, sillä sen sisältämät ravinteet, kuten typpi, fosfori ja rauta, jotka ovat edellytys kasvien kasvu (Davis 2010). Lääkeaineiden pitoisuuksia lietteessä ja niiden vaikutuksia on kuitenkin tutkittava mahdollisten riskien varalta. Työn on tarkoitus käsitellä aihetta näistä näkökulmista, ja tutkimuskysymykseni ovat:

- Minkälaisia kemiallisia ominaisuuksia lääkeaineilla on?
- Minkälaiset lääkeaineet päätyvät lietteeseen?
- Mitä eri lääkeaineille tapahtuu eri lietteenkäsittelyprosessissa?

Työ toteutetaan kirjallisuusselvityksenä, ja se kostuu viidestä luvusta. Luvussa 2 käydään läpi yleisesti yhdyskuntajäteveden puhdistusprosessi ja neljä lietteenkäsittelyprosessia. 3. luvussa puolestaan käsitellään eri lääkeaineryhmien ominaisuuksia. Luvussa 4 tarkastellaan lääkeaineiden käyttäytymistä jätevesi- ja lietteenkäsittelyprosesseissa. 5. luvussa tehdään johtopäätökset.

## 2. JÄTEVESIPROSESSI JA LIETTEENKÄSITTELY

Tässä luvussa käydään läpi yhdyskuntajäteveden puhdistusprosessi ja se, kuinka prosessissa syntyy puhdistamolietettä. Lisäksi tarkastellaan puhdistusprosessin sitä, miten lietettä käsitellään sen jälkeen, kun se on poistettu jätevesiprosessista. Tarkasteluun on valittu Suomessa yleisimmät lietteenkäsittelymenetelmät, kompostointi ja mädätys, joista kompostointi on yleisin (Vilpanen & Toivikko 2017), sekä niille vaihtoehtoisiksi menetelmiksi märkähiilto (hydrothermal carbonization, HTC) ja polttaminen.

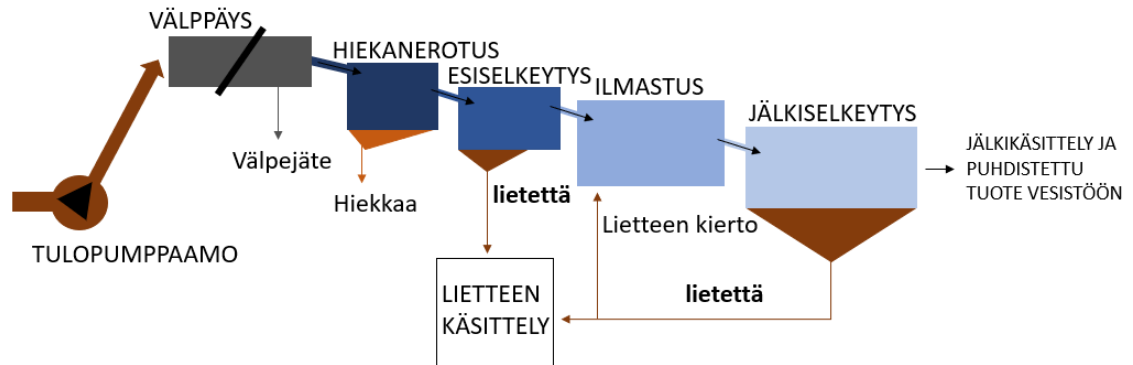
### 2.1 Jätevesiprosessi

Yleisin jäteveden käsittelyprosessi on biologis-kemiallisen käsittely, ja vuonna 1999 jätevesistä, jotka päätyivät viemäriin, 95 % kävi läpi kyseisen käsittelyn (RIL 2003, s. 30). Jätevedenpuhdistuksen pääasiallinen tarkoitus on poistaa vedestä kiintoaines, orgaaninen aine ja ravinteet (Vieno et al. 2007). Jätevesi saapuu viemäreitä pitkin puhdistamon pumppausasemalle, missä se pumpataan yläjuoksulle prosessin alkuun. Tätä seuraa virtauksen mittausta sekä välppäys. Välppäyksessä poistetaan jätevedestä välppäystankojen välejä suuremmat kappaleet. Hiekanerotus erottaa hiekan ja muun raskaamman aineksen, kuten lasi- ja metallikappaleet, jätevedestä tässä vaiheessa. Edellä mainittuja toimenpiteitä kutsutaan jäteveden esikäsittelyksi. (Davis 2010)

Seuraavassa vaiheessa, esiselkeytyksessä, poistetaan merkittävä osa jäteveden sisältämästä kiintoaineesta laskeuttamalla. Tässä vaiheessa poistetaan myös muita partikkeleita, jotka eivät poistuneet hiekanerotuksessa. Esiselkeytyksessä syntyy lietettä 0,25–0,35 prosenttia jäteveden tilavuudesta. (Davis 2010)

Esiselkeytyksen jälkeen on vuorossa biologinen käsittely, aktiivilieteprosessi, jota kutsutaan myös sekundääriseksi käsittelyksi. Tässä prosessin osassa poistetaan mikrobien avulla pääasiassa helposti biohajoavaa orgaanista ainesta, kiintoainesta sekä typpeä ja fosforia. (Davis 2010) Aktiivilieteprosessi alkaa ilmastuksella, jossa aktiiviliete sekoitetaan ilman avulla jäteveteen (RIL 2004, s. 183). Ilmastuksen tarkoitus on taata bakteereille happi, jota ne tarvitsevat orgaanisen aineksen hapettamiseen (Davis 2010). Tämän jälkeen seuraa jälkiselkeytys, jossa liete erotetaan vedestä. Osana aktiivilieteprosessia on myös järjestelmä, joka palauttaa osan syntyneestä lietteestä selkeytysaltaasta ilmastusaltaaseen. Täten ilmastusaltaasta saadaan pidettyä yllä haluttu lietekonsentraatio. Ylimääräinen liete poistetaan ja johdetaan jatkokäsittelyyn.

(RIL 2004, s. 555) Aktiivilieteprosessissa muodostuu lisää lietettä, ja siinä lietteen kokonaistilavuus kasvaa 1,5–2,0 prosenttiin käsitellyn veden tilavuudesta. Lietettä syntyy siis pääosin esiselkeytyksessä ja aktiivilieteprosessissa. (Davis 2010) Lietteen syntypaikat ovat nähtävissä kuvassa 1, johon on kuvattu yksinkertainen jätevesiprosessi.



Kuva 1. *Esimerkki jätevesiprosessista. Prosessin osat, joissa lietettä syntyy, ovat esi- ja jälkiselkeytys*

Jälkiselkeytyksessä tarkoituksena selkeyttää lopullinen purkuvesistöihin laskettava puhdistettu tuote ja tiivistää erotettavaa lietettä korkeamman kiintoainepitoisuuden saavuttamiseksi. Jälkiselkeytystä seuraa vielä jälkikäsitteilyn, jonka jälkeen puhdistettava vesi poistuu puhdistamolta. (Davis 2010)

## 2.2 Lietteenkäsittelyprosessit

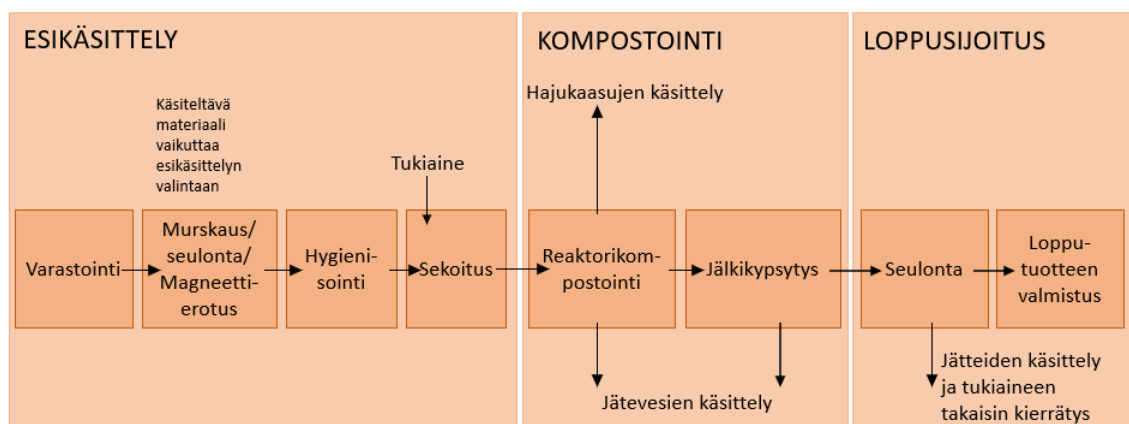
Suomessa vuosittain muodostuvan vesihuollon ja jätevedenpuhdistamoiden kuivaamaton lietemäärä on 840 000 t/a (Pöyry Environment Oy 2007). Ennen varsinaisia lietteenkäsittelyprosesseja liete käy läpi esikäsitteilyn, jonka tarkoituksena on lietemäärän pienentäminen, lietteen laadun parantaminen, varsinaisen prosessin tehostaminen ja loppusijoituksesta aiheutuvien haittojen minimointi (Pöyry Environment Oy 2007). Esikäsitteilyn on lisäksi tarkoitus joko suojella myöhempien vaiheiden laitteita ja tehdä materiaalista homogeenistä tai tehdä molempia. Esikäsitteilyyn voi kuulua seulonta, hienonnus, hiekanerotus, sekoitus ja varastointi. Olennaisiin lietteenkäsittelyprosesseihin kuuluu lietteen tiivistäminen. Puhdistamolta poistuessaan liete sisältää vielä suuren määrän vettä. Yksi lietteenkäsittelyn tehtävistä onkin erottaa vesi kiinteästä jäännöksestä. Käsittelyssä erotettu vesi johdetaan takaisin jätevedenpuhdistamolle. (Davis 2010)

### **Kompostointi**

Kompostointitekniikoista Suomessa on käytetty tai rakenteilla tunneli-, rumpu-, torni-, kontti- ja membraanikompostointia. Laitostyypeistä yleisin on tunnelikompostointi ja toiseksi yleisin rumpukompostointi. (Pöyry Environment Oy 2007)

Kompostoinnin kannalta lietteen esikäsittelyssä on tärkeää kosteuden säätö prosessin käynnistymisen vaatimalle tasolle ja kompostoitavan aineksen ilmavan rakenteen aikaansaaminen. Kompostointia varten esikäsittelyssä voidaan poistaa lietteestä myös epäpuhtauksia. Kompostoitaessa aineksessa ei saa olla esimerkiksi mikrobitoimintaa haittaavia kemikaaleja. Kompostoitavaan ainekseen lisätään tukiaine, joka voi koostua puuhakkeesta ja turpeesta, ja se voidaan tarvittaessa murskataan sopivaan palakokoon. Puhdistamolietteen tarvitsema tukiainemäärä on 1-2 kertaa lietteen tilavuus. Tukiaine voidaan joissain tapauksissa kierrättää uudelleen käytettäväksi. (Pöyry Environment Oy 2007)

Itse kompostointi jakautuu kahteen osaan (kuva 2). Siihen kuuluu reaktorissa tehtävä esikompostointi ja aumoissa tapahtuva jälkikypsytytys. Kompostoitavan aineksen sekoitus, ilmastus ja hygienisointi sekä kompostikaasujen poisto ja kosteuden säätäminen tapahtuvat esikompostoinnissa. Jälkikypsytytys tapahtuu yleisesti avoimella kentällä, mutta vaihtoehtona on tehdä se katetussa tilassa. (Pöyry Environment Oy 2007)



Kuva 2. Kompostointiprosessin lohkokaavio. Perustuu Pöyryn selvityksen kuvaan (Pöyry Environment Oy 2007)

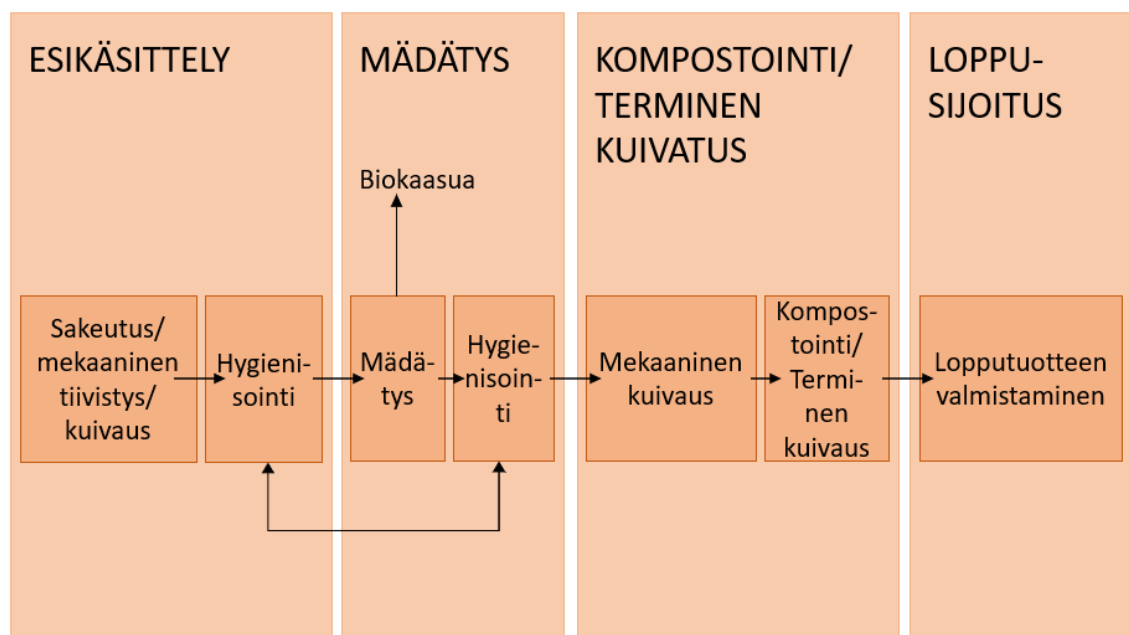
Kompostointi perustuu siihen, että aerobiset heterotrofiset mikro-organismit hyödyntävät orgaanista ainesta kompostoitavasta materiaalista energiana ja hapettavat sitä hiilidioksidiksi, vedeksi ja inerteiksi materiaaleiksi. Mikrobit siis käyttävät orgaanista ainesta energiantuotannossa, ja täten lietteen määrä pienenee. (Davis 2010)

Kun kompostoitava aines on käynyt läpi jälkikypsytyksen, se seulotaan, jotta siitä saataisiin poistettua epäpuhtaudet ja tukiaine. Tämän jälkeen tapahtuvan käsittelyn määrittää kompostoituneen massan käyttötarkoitus. Tavallisin toimenpide on hiekan lisääminen, jotta saadaan aikaiseksi multaa. Jos lopputuotetta käytetään lannoitteena tai maanparannusaineena, sen tulee täyttää tietyt kriteerit. (Pöyry Environment Oy 2007) Näitä kriteereitä määritellään esimerkiksi lannoitevalmistelain (539/2006) asetuksissa 24/11 ja 11/12.



## Mädätys

Mädätyksen päätyypit ovat kuiva- ja märkämädätys, joista yleisempi on märkämädätys. Siinä lietteen kiintoainepitoisuus on enintään 15 %. Kuivamädätyksessä lietteessä on kiintoainetta 20-40 %. Mädätysprosessi koostuu esikäsittelystä, varsinaisesta mädätyksestä, kompostoinnista tai termisestä kuivauksesta sekä loppusijoituksesta. Esikäsittelyssä liete sakeutetaan ja tarpeen mukaan hygienisoidaan. Erillisen hygienisointiyksikön tarve riippuu siitä, ovatko lietteen jatkokäsittelyssä lämpötilat riittävän korkeat ja mädätyksen keskimääräinen viipymä riittävän pitkä, jotta liete hygienisoituu ilman erillistä hygienisointia. (Pöry Environment Oy 2007) Mädätyksen prosessiketju on esitetty lohkokaaviona kuvassa 2.



Kuva 3. Mädätysprosessin lohkokaavio. Perustuu Pöryryn selvityksen kuvaan (Pöry Environment Oy 2007)

Mädätys tapahtuu reaktorissa hapettomissa oloissa. Mädätyslämpötila voidaan valita joko n. 37 °C:een tai 55 °C:een. Valitun lämpötilan mukaan prosessia kutsutaan joko mesofiiliseksi (37 °C) tai termofiiliseksi (55 °C). Suomessa mädättämöt ovat yleensä mesofiilisiä. Mädätysprosessissa orgaaninen aines muuttuu metaanipitoiseksi mikrobien vaikutuksesta ja kiintoaine vähenee. Ravinteet muuttuvat orgaanisesta epäorgaaniseen muotoon. (Pöry Environment Oy 2007)

Lietteen loppukäsittely mädätyksen jälkeen riippuu lietteen laadusta ja siitä, mihin sitä halutaan käyttää. Termisesti käsitelty ja mekaanisesti kuivattu liete kelpaa maanparannusaineeksi sellaisenaan, mesofiilisesti käsitelty liete vaati stabiloinnin. Jos mädätetään puhdistamolietteen lisäksi lantaa tai lantatuotteita, hygienisointivaatimukset

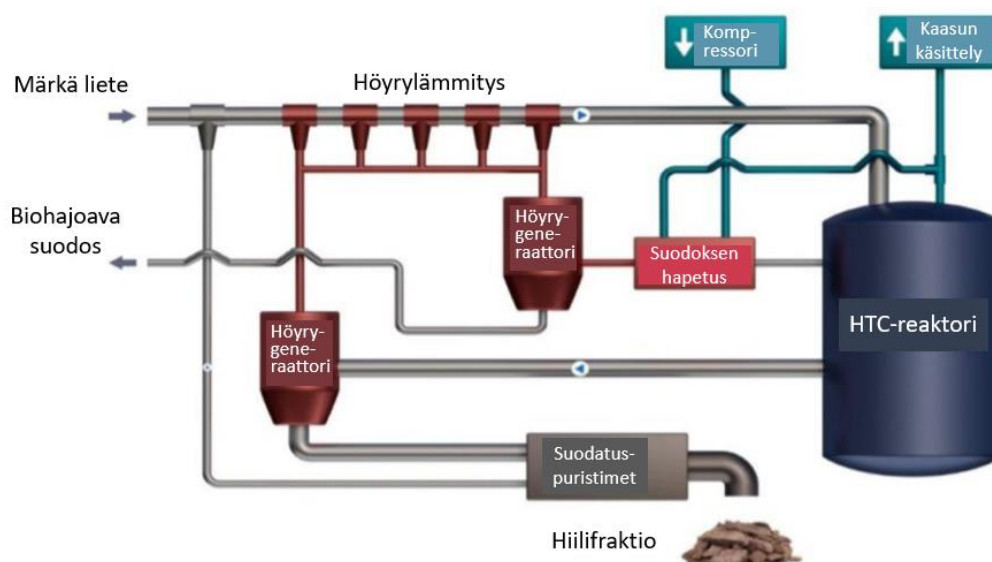
lopputuotteen suhteen ovat tiukemmat. Vaatimuksiin vastaavia jatkokäsittelymenetelmiä ovat esimerkiksi kompostointi tai terminen kuivaus. (Pöry Environment Oy 2007)

### **Märkähiilto**

Lietteen märkähiiltoprosessissa (englanniksi hydrothermal carbonization, mistä toinen suomenkielinen nimitys HTC-käsittely on peräisin) biomassaa käsitellään kosteana, sen kuiva-ainepitoisuuden ollessa n. 20 %. Prosessi tapahtuu suljetussa astiassa ja lämpötila on n. 180–250 °C ja paine nousee aina 10-40 baariin asti. Prosessissa syntyy kuivaa biohiilifraktiota, rejektivettä ja kaasua. Käsittelyaika on yleensä muutamia tunteja. Prosessissa orgaaninen aines hydrolysoituu ja siitä poistuu vetyä sekä happea dehydraatioreaktioissa. Kemiallisesti märkähiilto on mutkikas prosessi ja on riippuvainen lähtöaineen koostumuksesta sekä käsittelyparametreista, kuten lämpötilasta, käsittelyajasta, nesteen määrästä ja pH:sta. (Ylivainio et al. 2019)

Kun liete on käsitelty, käsittelyssä syntynyt biohiilifraktio jäähdytetään ja kuivataan. Kuivatun lopputuotteen kuiva-ainepitoisuus on 50-70 %. Kuivauksesta saadaan kiintoainetta, joka johdetaan jatkokäyttöön, yleensä polttoon. Koska kuivatulla märkähiilletyllä tuotteella on riittävän korkea lämpöarvo, sitä voidaan käyttää itsessään polttoaineena ilman apupolttoainetta. Tuotetta voitaisiin käyttää mahdollisesti myös maanparannusaineena ja suodatinmateriaalina tai adsorbenttina. Prosessissa syntyy myös rejektivettä, joka johdetaan yleensä takaisin jätevedenpuhdistamolle, mutta joka voidaan johtaa myös mädättämöön biokaasun tuotantoa varten. (Pöry Finland Oy 2019)

Kuvaan 3 on kuvattu esimerkki märkähiiltoprosessista. (Pöry Finland Oy 2019)



Kuva 4. Märkähiiltoprosessi. Muokattu lähteenPöry Finland Oy (2019) kuvasta.

Märkähiilto on lupaava jätevesilietteen käsittelymenetelmä. Prosessi on nopea, käynnistys ja sammutus tapahtuvat ilman viivettä eivätkä sitä häiritse biologisten

prosessien häiritsejät, kuten häiritse-aineet tai vaihteleva virtaus (Robbiani 2013). Korkean paineen ja lämpötilan ansiosta lopullinen tuote on steriiliä ja osa orgaanisista häiritse-aineista on tuhoutunut (Weiner et al. 2013).

### **Poltto**

Vaikka Suomessa yhdyskuntajätevesien puhdistuksesta syntynyttä lietettä ei juurikaan polteta, otettiin poltto mukaan tarkasteluun, koska sitä käytetään muualla Euroopassa yleisesti lietteenkäsittelyssä. Saksassa otettiin käyttöön ensimmäiset lietettä polttavat laitokset jo 1960-luvulla. Lietteen polttamisesta on tullut yleistä joissain Keski-Euroopan maissa, joita ovat Saksan lisäksi esimerkiksi Sveitsi, Itävalta ja Hollanti. (Pöyry Finland Oy 2019) Suomessa oli vuonna 2015 vain kaksi pientä määrää lietettä polttavaa laitosta: Fortumin voimalaitos Riihimäellä ja Vapon voimalaitos Haapavedellä. Lisäksi näillä laitoksilla lietteen osuus poltettavasta jakeesta on marginaalisen pieni. Esimerkiksi Haapaveden laitoksella lietteen osuus kaikesta polttoaineesta on korkeintaan 1 %. (Vilpanen & Toivikko 2017) Tämä tarkoittaa sitä, että voimalaitos on yhteispolttolaitos, sillä se käyttää polttoaineenaan lietteen lisäksi muitakin jätettä. Tyypillisesti lietettä käsitellään jätteenpolttolaitoksilla, hiili- ja ligniittivoimalaitoksilla, sementtisuoneissa ja Suomen kohdalla metsäteollisuuden polttolaitoksilla (Pöyry Finland Oy 2019). Suomessa otettiin heinäkuussa 2019 koekäyttöön myös lietteen erillispolttolaitos, joka sijaitsee Rovaniemellä (Setälä 2019). Lietettä polttavan voimalaitoksen tulee täyttää jätteenpolttolaitokselle asetetut vaatimukset, ja laitoksen ympäristöluvan tulee olla sellainen, että liete on hyväksytty siinä laitoksen polttoaineeksi (Pöyry Finland Oy 2019).

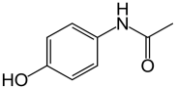
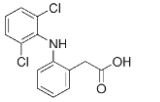
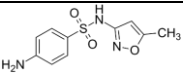
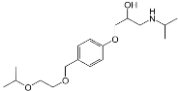
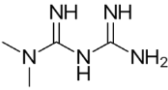
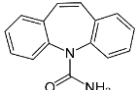
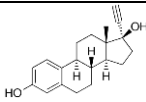
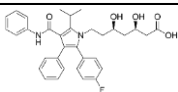
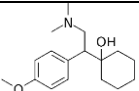
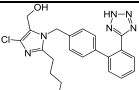
Polton kyky tuhota lietteen häiritse-aineita yleistänyt tekniikan käyttämistä. Polttamalla lietteestä voidaan poistaa tehokkaasti orgaaniset aineet, lääkeaineet ja mikromuovit sekä tuhota mikrobit kokonaan. (Pöyry Finland Oy 2019) Edellä mainitut aineet tuhoutuvat tehokkaasti yli 850 °C lämpötilassa (UNEP 2004, Pöyry Finland Oy 2019 mukaan). Erillispoltossa lämpötila onkin yleensä n. 850–950 °C. Ennen sitä liete on kuivattu termisesti. Poltosta saatavaa energiaa voidaan siirtää esimerkiksi höyryyn, ja hyödyntää sähköä ja lämmön tuottamisessa. Yleisimpiä erillispoltossa käytettyjä tekniikoita ovat stationaariset ja kiertoleijupetikattilat (stationary/circulating fluidized bed). Muita vaihtoehtoja ovat arinakattila, sykloidisuuni, pyörösuuni (rotary kiln), kiinteäliesi- ja moniliesisuuni (static/multiple hearth) sekä pyörivä ja kuplaleijupetisuuni (bubbling/rotating fluidized bed). Suomessa on kehitetty PAKU-tekniikka, jossa polttoaineen lämpöä kierrätetään termiseen kuivaukseen. (Pöyry Finland Oy 2019)

### 3. LÄÄKEAINEIDEN OMINAISUUDET

Tämä luku esittelee tarkasteltavaksi valitut lääkeaineet ja niiden ominaisuuksia. Tarkasteluun valikoitiin muun muassa sellaisia lääkeaineita, jotka ovat Suomessa yleisiä, käyttäen apuna Kelan ja Fimean Suomen lääketilastoa vuodelta 2017 (Fimea & Kela 2018). Osa lääkeaineista ovat tarkastelussa mukana toisenlaisin perustein: Diklofenaakki ja etinyyliestradioli otettiin mukaan, koska niiden esiintyminen vesistöissä herättää kiinnostusta. Euroopan parlamentti on esimerkiksi asettanut ne erityiselle tarkkailulistalle, jotta niiden aiheuttamista riskeistä saataisiin enemmän tietoa (European Parliament 2013). Karbamatsepiini puolestaan on ominaisuuksiltaan kiinnostava, koska sen on todettu hajoavan huonosti jätevedenpuhdistusprosessissa (Vieno et al. 2007). Tässä työssä tarkastelun kohteena on kaikkiaan kymmenen eri lääkeainetta eri lääkeaineryhmistä (parasetamoli, diklofenaakki, sulfametoksatsoli, bisoprololi, metformiini, etinyyliestradioli, atorvastatiini, karbamatsepiini, venlafaksiini ja losartaani).

Lääkeaineiden poistamista jätevedestä voidaan tarkastella kinetiikan ja tiettyjen parametrien, kuten oktanoli/vesi-jakaantumiskertoimien ( $\log K_{ow}$ ), lääkeaineiden adsorptiokertoimien ( $\log K_d$ ) ja biohajoavuusvakioiden (biodegradation constants,  $k_{biol}$ ) avulla (Tran et al. 2018). Taulukkoon 1 on koottu tässä työssä tarkasteltavat lääkeaineet ja niiden edellä mainittuja ominaisuuksia.

Taulukko 1. Valittujen lääkeaineiden ominaisuuksia

Log $K_{ow}$ =oktanoli/vesi-jakautumiskerroin		Log $K_d$ =liete/vesi-jakautumiskerroin		$k_{biol}$ =biohajoavuuskero	
Lääkeryhmä	Esimerkilääkeaine	Molekyyli rakenne	$k_{biol}$ (L/gMLSS d) <sup>2</sup>	Log $K_{ow}$ <sup>1</sup>	Log $K_d$
Analgeetit	Parasetamoli		–	0,46	–
	Diklofenaakki		0,02–8,0	4,51	–
Antibiootit	Sulfametoksatsoli		0,1–5,0	0,89	–
				0,99	–
Betasalpaajat	Bisoprololi		–	1,87	–
				1,97	–
Diabeteslääkkeet	Metformiini		–	-2,64	–
				0,48	–
Epilepsialääkkeet	Karbamatsepiini		0.005–0.389	2,45	–
				1,96	–
Hormonilääkkeet	Etinyyliestradioli		0,02–20	3,67	–
				2,72	–
Kolesterolilääkkeet	Atorvastatiini		–	6,36	–
				–	–
Masennuslääkkeet	Venlafaksiini		–	3,2	–
				2	–
Verenpainelääkkeet	Losartaani		–	4,01	–
				–	–

<sup>1</sup> Lähde: PubChem: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/><sup>2</sup> Lähde: Tran et al. (2018)

Joss et al. (2006) esittää tutkimuksessaan haitta-aineiden biohajoavuuden arvioimiseksi seuraavaa perustuen niiden biohajoavuusvakioden ( $k_{biol}$ ) arvoihin: Yhdisteiden, joiden  $k_{biol} < 0,1$  L/gMLSS d, hajoaminen on vähäistä (<20%), kun taas ne yhdisteet, joilla  $0,1 < k_{biol} < 10$  L/gMLSS d, hajoavat kohtalaisesti, ja niistä yhdisteistä, joiden  $k_{biol} > 10$  L/gMLSS d, odotetaan hajoavan >90%. Biohajoavuusvakiot antavat jonkinlaisen käsityksen siitä, onko jotain lääkeainetta löydettävistä sellaisenaan puhdistamon purkuvesistä tai lietteestä, vai onko se mahdollisesti hajonnut jo jätevesiprosessin aikana.

Log  $K_{ow}$  on oktanoli/vesi-jakaantumiskerroin, jolla kuvataan aineen jakaantumista oktanolin ja veden välillä. Yhdisteiden Log  $K_{ow}$ -arvojen ja sen, hakeutuvatko yhdisteet veteen vai lietteeseen välillä on havaittavissa selkeä yhteys. Tran et al. (2018) mukaan on yleisesti tunnustettu, että yhdisteillä, joilla log  $K_{ow} > 4,0$ , on suurempi todennäköisyys adsorboitua lietteeseen, kun taas ne yhdisteet, joilla log  $K_{ow} < 2,5$ , osoittivat heikkoa

adsorboitumista. Niillä lääkeaineilla, joiden  $\log K_{ow}$ -arvot asettuvat välille  $2,5 < \log K_{ow} < 4,0$ , adsorptiokyky on keskimääräinen (Tran et al. 2018). Tämän tiedon valossa voidaan tässä työssä tutkittavien lääkeaineiden osalta arvioida, että atorvastatiini, diklofenaakki ja losartaani adsorboituisivat hyvin lietteeseen. Keskimääräistä adsorptiota voidaan olettaa etinyyliestradiolilta ja venlafaksiinilta. Loput lääkeaineista, bisoprololi, karbamatsapiini, metformiini, parasetamoli ja sulfametoksatsoli, adsorboituvat  $\log K_{ow}$ -arvojensa perusteella heikosti lietteeseen.

Toinen adsorptiota kuvaavista kertoimista on liete/vesi-jakaantumiskerroin  $\log K_d$ . Sen avulla voidaan ennustaa lääkeaineiden jakautumista veden ja lietteen (Ternes et al. 2004, Carballa et al. 2008). Carballa et al. (2008) tutkimuksessa käy ilmi, että aineilla, joiden  $\log K_d$ -arvo on välillä 0,7–1,9, adsorptio lietteeseen ei ole merkittävää. Niillä aineilla, joilla  $\log K_d$ -arvot ovat välillä 3,5–4,4 (myskihajuvet) tai 2,1–2,9 (estrogeenit), adsorptio puolestaan on merkittävää, 80-90% näistä aineista adsorboituu partikkeleihin ja vain 20% liukenee vesifaasiin. Tämän perusteella lääkeaineista etinyyliestradioli ja diklofenaakki adsorboituisivat hyvin lietteeseen, kun taas metformiinilla ja parasetamolilla adsorptio olisi heikkoa. Keskimääräistä adsorptiota voidaan arvojen perusteella odottaa bisoprololilta, karbamatsapiinilta ja venlafaksiinilta. Sulfametoksatsolille saatujen kahden  $\log K_d$ -arvon välillä vallitsee ristiriita. Joillain lääkeaineilla on havaittavissa selkeää samankaltaisuutta  $\log K_{ow}$ - ja  $\log K_d$ -arvojen välillä.

Parasetamolin osalta adsorption lietteeseen voidaan olettaa olevan heikkoa, sillä kyseisen lääkeaineen  $\log K_{ow}$ - ja  $\log K_d$ -arvot ovat alhaiset. Tätä tukee myös Yu & Wu (2012) tekemän tutkimuksen tulokset, joissa parasetamolin määrän tutkitussa lietteessä todettiin olevan alhainen suhteessa muihin lääkeaineisiin. Parasetamoli on erittäin biohajoava (Vieno 2015). Hörsing et al. (2011) toteaa venlafaksiinille erittäin heikon adsorboitumisen lietteeseen. Venlafaksiinin  $\log K_d$ -arvo (Hörsing et al. 2011) on suhteellisen alhainen, eikä  $\log K_{ow}$ -arvokaan ole kovin korkea, joten nämä tukevat edellä mainittua toteamusta. Metformiinin  $\log K_{ow}$ - ja  $\log K_d$ -arvot ovat erittäin alhaiset, joten voitaneen olettaa, että lääkeaineen adsorboituminen lietteeseen ei ole merkittävää. Diklofenaakille todettiin alhainen adsorboituminen lietteeseen Hörsing et al. (2011) tekemässä tutkimuksessa.

Myös bisoprololin oletetaan kuuluvan  $\log K_{ow}$ - ja  $\log K_d$ -arvojensa perusteella lietteeseen heikosti adsorboituvien lääkeaineiden ryhmään. Lahti & Oikari (2011) totesivat tutkimuksessaan, että bisoprololin biohajoaminen on osittaista (hajoava osuus  $\geq 30\%$ ). Bisoprololi oli yksi Hörsing et al. (2011) tutkimista lääkeaineista, joiden todettiin olevan rajoilla vesiliukoisuuden ja matalan lietteeseen adsorboitumisen suhteen.

Karbamatsepiinin adsorboituminen puhdistamolietteeseen on heikkoa (Vieno et al. 2007, Hörsing et al. 2011, Huang et al. 2019). Huang et al. (2019) mukaan karbamatsepiinista adsorboituu vain 19,5% lietteeseen. Karbamatsepiinin log  $K_{ow}$ -arvo tukee tavallaan näitä tuloksia, vaikka se tai karbamatsepiinin log  $K_d$ -arvot eivät olekaan muihin lääkeaineisiin verrattuna alhaisimmat.

Sulfametoksatsolille löydettyjen kahden log  $K_d$ -arvon välillä vallitsee ristiriita. Lisäksi sen alhaisen log  $K_{ow}$ -arvon ja Hyland et al. (2012) määrittämän, suhteellisen korkean log  $K_d$ -arvon välillä vallitsee ristiriita. Adsorption määräksi sulfametoksatsolille on saatu 35,8% ja sille on todettu 8,2% desorptiota lietteestä, mikä viittaa siihen, että kyseisen lääkeaineen ja aktiivilietteen välillä vallitsee vahva affiniteetti (Huang et al. 2019).

Etinyyliestradiolin voidaan päätellä log  $K_{ow}$ -arvonsa perusteella olevan hydrofobinen. Sen log  $K_d$ -arvokin on suhteellisen korkea. Yhdessä nämä seikat tukevat Huang et al. (2019) tekemän tutkimuksen tulosta, jonka mukaan tämä kyseinen lääkeaine adsorboituisi helposti lietteeseen. Lee et al. (2009) tutkimustulosten perusteella myös atorvastatiinin adsorptio lietteeseen on suhteellisen korkea, 66%. Tätä tulosta tukee atorvastatiinin muita tähän työhön valittuja lääkeaineita korkeampi log  $K_{ow}$ -arvo.

## 4. LÄÄKEAINEET JÄTEVESI- JA LIETTEENKÄSITTELYPROSESSEISSA

Jelic et al. (2011) tutkimuksessa tutkittiin 43 lääkeaineen esiintymistä kolmen espanjalaisen jätevedenpuhdistamon jätevesissä. Tutkimuksen puhdistamoista kaksi käsitteli pääasiassa yhdyskuntajätevettä, kun taas yhden käsittelemästä vedestä merkittävä osa oli peräisin teollisuudesta. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että tutkituista yhdisteistä 32 esiintyi puhdistamolle tulevassa vedessä ja 29 puhdistamolta poistuvassa vedessä. Lääkeaineiden pitoisuus vaihteli nanogrammoista muutamiin mikrogrammoihin litraa kohden. Lietenäytteiden analyysi osoitti, että 21 lääkeainetta kerääntyi kaikilla tutkituilla puhdistamoilla lietteeseen, ja niiden pitoisuudet ylsivät 100 ng/g asti. Tästä voidaan päätellä, että merkittävä osa lääkeaineista päätyy ainakin joissain pitoisuuksissa puhdistamolietteeseen. Tässä luvussa käsitellään sitä, mitkä lääkeaineet päätyvät jätevedenpuhdistamolla lietteeseen, ja miten ne käyttäytyvät lietteenkäsittelyssä.

Parasetamoli on erittäin biohajoava, yli 80% hajoaa biologisesti jätevesiprosessin, joten sitä ei senkään takia päädy suurissa määrin lietteeseen (Vieno 2015). Yu & Wu (2012) tutkimuksen tuloksen mukaan parasetamolin pitoisuudet lietteessä vaihtelivat neljällä yhdyskuntajätevedenpuhdistamolla välillä 41,2–119 ng/g. Vaikka parasetamolia päätyykin lietteeseen, voidaan sen olettaa poistuvan siitäkin tehokkaasti hyvän biohajoavuutensa takia. Scheurer et al. (2009) havaitsi tutkimuksessaan metformiinille keskimäärin 89% poistotehon jätevedestä tarkastelun kohteena olevilla puhdistamoilla. Huolimatta suuresta poistotehosta, Scheurer et al. (2009) toteaa, että metformiinia vapautuu vesistöihin merkittäviä määriä. Metformiinin alhaisten log  $K_{ow}$ - ja log  $K_d$ -arvojen perusteella oletetaan, ettei sitä päädy merkittävässä määrin lietteeseen. Hörsing et al. (2011) mukaan bisoprololi käyttäytyi eri tavalla eri lietetyypeissä, siten että se adsorboitui sekundäärilietteeseen, mutta primäärilietteeseen ei. Bisoprololin alhainen log  $K_{ow}$ -arvo antaa olettaa, että sen adsorboituminen lietteeseen ei ole merkittävää. Edellä mainittuja lääkeaineita ei tarkastella lietteenkäsittelyn osalta.

60,9% etinyyliestradiolista on huomattu poistuvan nestemäisestä faasista. Tämä poistuvan osan suuruus voi olla selitettävissä etinyyliestradiolin suhteellisen korkeilla log  $K_{ow}$ - ja log  $K_d$ -arvoilla. Lee et al. (2009) totesi tutkimuksessaan, että atorvastatiinista poistuu jätevedestä keskimäärin 66%. Atorvastatiinin log  $K_{ow}$ -arvo on muiden lääkeaineiden vastaavia arvoja korkeampi, joten sen perusteella sen oletetaan adsorboituvan lietteeseen. Etinyyliestradiolin ja atorvastatiinin oletetaan siis päätyvän lietteeseen ja ne otetaan mukaan tarkasteluun.



Karbamatsepiinin adsorboituminen puhdistamolietteeseen on heikkoa (Vieno et al. 2007, Hörsing et al. 2011, Huang et al. 2019). Vieno et al. (2007) havaitsi tutkimuksessaan karbamatsepiinipitoisuuksien saavan toistuvasti korkeampia arvoja käsitellyssä kuin käsittelemättömässä jätevedessä. Radjenović et al. (2009b) antaa tälle selitykseksi sen, että karbamatsepiinihydroksidi (carbamazepine hydroxide), joka on karbamatsepiinille ihmiskehossa tapahtuvan metabolian tuote, saattaa palata alkuperäiseen muotoonsa jätevesiprosessissa. Huolimatta heikosta adsorbtiostaan lietteeseen, karbamatsepiini on todennäköisesti huomioitava tässä työssä, sillä Yu & Wu (2012) mukaan puhdistamolietteistä löytyi karbamatsepiinijäämiä, ja useat lähteet osoittavat, että karbamatsepiinin biohajoavuus on erittäin heikkoa (Haiba et al. 2018, Tran et al. 2018, Huang et al. 2019). Lietteeseen päätyvien karbamatsepiinipitoisuuksien ei siis voida olettaa merkittävästi pienenevän hajoamisen tuloksena. Yu & Wu (2012) mukaan tarkasteltujen puhdistamoiden lietteiden karbamatsepiinipitoisuudet olivat välillä 60,6–371 ng/g.

Diklofenaakin log  $K_{ow}$ - ja log  $K_d$ -arvot ovat suhteellisen korkeat, mutta Hörsing et al. (2011) tekemässä tutkimuksessa sen adsorboituminen lietteeseen on todettu olevan alhainen. Lisäksi useammassa tutkimuksessa diklofenaakin on todettu olevan hitaasti tai heikosti biohajoava (Buser et al. 1998, Joss et al. 2005, Lee et al. 2012). Diklofenaakin pitoisuudet lietteessä vaihtelivat Yu & Wu (2012) tutkimilla puhdistamoilla välillä 86,6–421 ng/g. Diklofenaakin poistotehokkuus jätevedenpuhdistamolla on heikko (Yu et al. 2006, Vieno 2014). Yu et al. (2006) mukaan poistoaste oli vain 18%. Ristiriitaisuudestaan johtuen diklofenaakki otetaan mukaan tarkasteluun

Losartaanille todettu poistoteho jätevesiprosessissa on verrattaen alhainen, vain 33%. On osoitettu, että sitä päätyy primäärilietteeseen 25–86 ng/g ja aktiivilietteeseen 8,0–26 ng/g. Losartaania päätyy primäärilietteeseen 25–86 ng/g ja aktiivilietteeseen 8,0–26 ng/g. (Matsuo et al. 2011) Losartaanin suhteen vallitsee ristiriita, sillä sen log  $K_{ow}$ -arvo on tämän työn muihin lääkeaineisiin verrattuna korkeimmasta päästä.

Sulfametoksatsolin merkittävä poistumisreitti on biohajoaminen, mutta asiasta on saatu vaihtelevia tutkimustuloksia (Onesios et al. 2009, Radjenović et al. 2009). Sulfametoksatsolille on todettu biohajoavuusasteeksi (biodegradation rate) 29,18% ja poistoasteeksi (removal rate) 50,22%. Sulfametoksatsolin on havaittu hajoavan valon vaikutuksesta (Zhou & Moore 1994, Trovó et al. 2009). Hörsing et al. (2011) puolestaan arvioi, että vain noin 10% sulfametoksatsolista poistuu jätevestä puhdistusprosessissa. Tämäkin lääkeaine lienee ristiriitaisuudesta johtuen syytä ottaa mukaan lopulliseen tarkasteluun.

Edeltäneen pohdinnan perusteella keskitytään tämän luvun tarkastelussa siis seuraaviin lääkeaineisiin: karbamatsepiini, losartaani, diklofenaakki, sulfametoksatsoli, etinyyliestradioli ja atorvastatiini. Esimerkiksi Jelic et al. (2011) havaitsi tutkimuksessaan näistä lääkeaineista lietteessä atorvastatiinia, diklofenaakkia, karbamatsepiinia.

Kaikki lääkeaineet eivät poistu tai vähene lietteestä mädätyksessä, mutta pääsääntöisesti ne hajoavat merkittävässä määrin kompostoinnissa (taulukko 3). Tämä pätee muillekin kuin tässä työssä käsitellyille lääkeaineille. (Vieno 2015) Edeltäneen perusteella voidaan todeta, että kompostointi on lääkeaineiden poistamisen kannalta yleisesti tehokkaampi kuin mädätys. Syynä tähän eroon on se, että kompostointi tapahtuu aerobisissa oloissa ja mädätys anaerobisissa ja useat aineet hajoavat aerobisesti merkittävästi nopeammin, kuin anaerobisesti, vaikka ne voisivatkin hajota myös anaerobisissa olosuhteissa. Lisäksi kompostoinnissa aineiden hajoamiselle jää enemmän aikaa, sillä kompostointiaika on usein mädätykseen käytettyä aikaa huomattavasti pidempi. (Vieno 2015)

Taulukko 2. Lääkeaineiden keskiarvopitoisuuksia lietteessä. Yksikkö: mg/kg. Lähde: Vieno (2015).

Lääkeaine	Käsittelemätön liete	Mädätys	Kompostointi
<b>Diklofenaakki</b>	0,168	0,088	0,009
<b>Sulfametoksatsoli</b>	0,031	< 0,05	< 0,05
<b>Karbamatsepiini</b>	0,108	0,108	0,025
<b>Etinyyliestradioli</b>	<0,1	<0,05	<0,05

Taulukkoon 3 on kerätty Vienon (2015) laatimasta julkaisusta keskiarvoisia pitoisuuksia niiltä lääkeaineilta, jotka päätyivät tässä työssä lopulliseen tarkasteluun. Taulukko osoittaa, että, että jopa diklofenaakin ja karbamatsepiinin, joita pidetään huonosti biohajoavina yhdisteinä, ja jotka eivät poistuneet mädätyksessä, pitoisuudet lietteessä vähenivät kompostoinnin aikana. Merkille pantavaa on myös se, että mädätyksellä ei vaikuttaisi olevan mitään vaikutusta karbamatsepiinipitoisuuteen. Taulukon arvojen perusteella sulfametoksatsoli ja etinyyliestradioli eivät varsinaisesti tarvitse kompostointia poistuaan lietteestä, sillä niiden pitoisuudet vähenivät mädätyksen aikana.

Kahden muun lietteenkäsittelyprosessin, märkähiillon ja polttamisen, suhteen tilanne on hieman vastaavan kaltainen. Weiner et al. (2013) tutkimuksen perusteella märkähiillo poisti lietteessä olevista lääkeaineista 20–100%, riippuen lääkeaineesta ja prosessin olosuhteista. Tämän perusteella voidaan todeta, että lietteen sisältämät lääkeaineet käyttäytyvät vaihtelevasti märkähiilokäsittelyssä. Karbamatsepiinin on eräässä

tutkimuksessa todettu häviävän lietteestä lähes täydellisesti märkähiilokäsittelyn aikana ( $\geq 97\%$  poistui). Saman tutkimuksen mukaan diklofenaakista keskimäärin  $>69\%$  hävisi lietteestä. Sulfametoksatsolin pitoisuudet pysyivät tutkimuksessa määritysrajan alapuolella. (vom Eyser et al. 2015) Kirschhöfer et al. (2016) puolestaan totesi tutkimuksessaan, että märkähiillolla pystytään poistamaan  $80\%$  karbamatsepiinista ja diklofenaakista ja sulfametoksatsolista jopa enemmän kuin  $90\%$ . Morais et al. (2018) tutkimuksessa etinyyliestradioli poistui märkähiilokäsittelyssä lähes täydellisesti ( $99.60\%$  poistui). Lietteen polttaminen puolestaan tuhoaa tehokkaasti lääkeaineita, jos lämpötila on yli  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  (UNEP 2004, Pöyry Finland Oy 2019).

Karbamatsepiinin todettiin poistuvan huonosti jätevedenpuhdistamolla. Kuitenkin vaikuttaisi siltä, että lietteestä se saadaan poistettua suhteellisen tehokkaasti lietteenkäsittelyprosesseilla. Se on kuitenkin heikon biohajoavuuskykynsä takia myös haastavin lietteestä poistettava lääkeaine. Mädätys ei vaikuta siihen ja kompostoinnissakin poistoteho on heikoin. Taulukon 3 mukaan siitä häviää kompostoinnissa  $77\%$ , kun taas diklofenaakista poistuu  $95\%$  kompostoinnissa. Muut lääkeaineista poistuivat tutkimuksen perusteella karbamatsepiinia helpommin lietteestä.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tarkoituksena oli määrittää, mitkä valituista lääkeaineista päätyvät jätevedenpuhdistamolla lietteeseen ja kuinka lietteenkäsittelymenetelmät vaikuttavat niihin. Tarkastellusta kymmenestä lääkeaineesta losartaanin, diklofenaakin, sulfametoksatsolin, etinyyliestradiolin, atorvastatiinin ja karbamatsepiinin arvioitiin päätyvän lietteeseen tai olevan heikosti biohajoavia, ja siitä syystä niiden käyttäytymistä lietteenkäsittelyssä tarkasteltiin.

Mädätyksen osalta havaittiin, että se poistaa lääkeaineita lietteestä vaihtelevalla teholla. Esimerkiksi karbamatsepiiniin se ei vaikuttanut tehoavan ollenkaan. Lietteenkäsittelymenetelmistä kompostoinnin ja polttamisen todettiin poistavan lääkeaineita lietteestä tehokkaasti. Myös märkähiiltoprosessi osoittautui tutkittavien lääkeaineiden osalta tehokkaaksi, vaikkakin sen poistotehokkuuden on todettu olevan vaihteleva poistettavasta lääkeaineesta ja prosessin olosuhteista riippuen. Kompostointikaan ei kuitenkaan välttämättä poista kaikkia lääkeaineita. Lietteenkäsittelymenetelmien poistotehoissa on siis eroja. Lisäksi prosesseista saatavat lopputuotteet vaikuttavat siihen, mikä prosesseista valitaan. Esimerkiksi kompostoinnin lopputuotteena saatavalla mullalla ja märkähiillosta saatavalla biohiilellä on erilaiset käyttökohteet: Multaa käytetään lannoitteena tai maanparannusaineena, biohiiltä puolestaan voidaan käyttää polttoaineena, suodatinmateriaalina tai adsorbenttina.

Edellä mainittujen seikkojen takia on syytä todeta, että lietteenkäsittelymenetelmät eivät välttämättä ole riittävän tehokkaita erillään käytettynä, mutta niitä yhdistelemällä voidaan päästä hyviin puhdistustuloksiin. Jotkin lietteenkäsittelytavat tehoavat joihinkin lääkeaineisiin paremmin kuin toiset. Lietettä voidaan hyödyntää maanviljelyssä, viherrakentamisessa tai energiana.

Työn edetessä heräsi uusia kysymyksiä, joihin tämä työ ei anna vastausta. Lääkeaineiden metaboliatuotteita ja niiden vaikutusta ympäristöön ei tässä tutkimuksessa käsitelty juuri lainkaan, ja ne ovatkin yksi mielenkiintoinen ja tärkeä tutkimusaihe, joka ansaitsisi uuden tutkimuksen. Toinen kiinnostava, ja tässä työssä hyvin suppeasti käsitelty, aihe ovat antibiootit. Niitä on havaittu kompostoinnin lopputuotteessa, ja niiden vaikutusta maaperään ja sen eliöihin olisikin syytä tutkia enemmän.

## LÄHTEET

*Bisesi J.H., Bridges W. & Klaine S.J.* (2014). Effects of the antidepressant venlafaxine on fish brain serotonin and predation behavior. *Aquatic Toxicology*. vol.148. pp.130-138.

*Calamari D., Zuccato E., Castiglioni S., Bagnati R. & Fanelli R.* (2003). Strategic Survey of Therapeutic Drugs in the Rivers Po and Lambro in Northern Italy. *Environmental science & technology*. vol.37. no.7. pp.1241-1248.

*Carballa M., Fink G., Omil F., Lema J.M. & Ternes T.* (2008). Determination of the solid–water distribution coefficient (K<sub>d</sub>) for pharmaceuticals, estrogens and musk fragrances in digested sludge. *Water Research*. vol.42. no.1. pp.287-295.

*Davis M.L.* (2010). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. McGraw-Hill Professional Publishing.

*European Parliament* (2013). Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. *Official Journal of the European Union*.

*Fimea* lääkäiden lääkehoito. saatavilla:

[https://www.fimea.fi/vaestolle/iakkaiden\\_laakehoito](https://www.fimea.fi/vaestolle/iakkaiden_laakehoito). [viitattu: 14.11.2019].

*Fimea & Kela* (2018). Suomen lääketilasto 2017. saatavilla:

<http://www.julkari.fi/handle/10024/137174>.

*Haiba E., Nei L., Herodes K., Ivask M. & Lillenberg M.* (2018). On the degradation of metformin and carbamazepine residues in sewage sludge compost. *Agronomy Research* 16. pp.696-707.

*Hörsing M., Ledin A., Grabic R., Fick J., Tysklind M., Jansen J.I.C. & Andersen H.R.* (2011). Determination of sorption of seventy-five pharmaceuticals in sewage sludge. *Water Research*. vol.45. no.15. pp.4470-4482.

*Huang Y., Guo J., Yan P., Gong H. & Fang F.* (2019). Sorption-desorption behavior of sulfamethoxazole, carbamazepine, bisphenol A and 17 $\alpha$ -ethinylestradiol in sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*. vol.368. pp.739-745.

*Hughes S.R., Kay P. & Brown L.E.* (2013). Global Synthesis and Critical Evaluation of Pharmaceutical Data Sets Collected from River Systems. *Environmental science & technology*. vol.47. no.2. pp.661-677.

*Hyland K.C., Dickenson E.R.V., Drewes J.E. & Higgins C.P.* (2012). Sorption of ionized and neutral emerging trace organic compounds onto activated sludge from different wastewater treatment configurations. *Water Research*. vol.46. no.6. pp.1958-1968.

*Jelic A., Gros M., Ginebreda A., Cespedes-Sánchez R., Ventura F., Petrovic M. & Barcelo D.* (2011). Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment. *Water Research*. vol.45. no.3. pp.1165-1176.

- Joss A., Zabczynski S., Göbel A., Hoffmann B., Löffler D., Mc Ardell C.S., Ternes T.A., Thomsen A. & Siegrist H.* (2006). Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme. *Water Research*. vol.40. no.8. pp.1686-1696.
- Kidd K.A., Blanchfield P.J., Mills K.H., Palace V.P., Evans R.E., Lazorchak J.M. & Flick R.W.* (2007). Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. vol.104. pp.8897-8901.
- Kirschhöfer F., Sahin O., Becker G.C., Meffert F., Nusser M., Anderer G., Kusche S., Kläusli T., Kruse A. & Brenner-Weiss G.* (2016). Wastewater treatment - adsorption of organic micropollutants on activated HTC-carbon derived from sewage sludge. *Water Science and Technology*. vol.73. no.3. pp.607-616.
- Lahti M. & Oikari A.* (2011). Microbial Transformation of Pharmaceuticals Naproxen, Bisoprolol, and Diclofenac in Aerobic and Anaerobic Environments. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. vol.61. no.2. pp.202-210.
- Lee H., Peart T.E., Lewina Svoboda M. & Backus S.* (2009). Occurrence and fate of rosuvastatin, rosuvastatin lactone, and atorvastatin in Canadian sewage and surface water samples. *Chemosphere*. vol.77. no.10. pp.1285-1291.
- Matsuo H., Sakamoto H., Arizono K. & Shinohara R.* (2011). Behavior of Pharmaceuticals in Waste Water Treatment Plant in Japan. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. vol.87. no.1. pp.31-35.
- Moraes R.L., Santiago M.F., Zang J.W., Fonseca-Zang W.A. & Schmidt F.* (2018). Removal of synthetic sex hormones by hydrothermal carbonization. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*. vol.90. no.2. pp.1327-1336.
- Onesios K.M., Yu J.T. & Bouwer E.J.* (2009). Biodegradation and removal of pharmaceuticals and personal care products in treatment systems: a review. *Biodegradation*. vol.20. no.4. pp.441-466.
- Pöntinen P.* (11.4.2018). Maailman vesistöissä virtaa yhä enemmän lääkeaineita - kukaan ei tiedä, miten ne poistetaan. Yle. saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-10154320>. [viitattu: 14.11.2019].
- Pöyry Environment Oy* (2007). Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky -selvitys. Sitra, Maa- ja metsätalousministeriö. saatavilla: <https://media.sitra.fi/2017/02/27172733/LietteenkC3A4sittely-2.pdf>.
- Pöyry Finland Oy* (2019). Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. Suomen Vesilaitosyhdistys ry. saatavilla: [https://www.vvy.fi/site/assets/files/2916/puhdistamolietteen\\_termiset\\_kasittelymenetelm\\_at\\_ja\\_niiden\\_soveltuvuus\\_suomeen.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/2916/puhdistamolietteen_termiset_kasittelymenetelm_at_ja_niiden_soveltuvuus_suomeen.pdf).
- Radjenović J., Jelić A., Petrović M. & Barceló D.* (2009). Determination of pharmaceuticals in sewage sludge by pressurized liquid extraction (PLE) coupled to liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS). *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. vol.393. no.6. pp.1685-1695.

*Radjenović J., Petrović M. & Barceló D.* (2009). Fate and distribution of pharmaceuticals in wastewater and sewage sludge of the conventional activated sludge (CAS) and advanced membrane bioreactor (MBR) treatment. *Water Research*. vol.43. no.3. pp.831-841.

*Rautiainen M.* (11.4.2018). Tutkijat varoittavat: Maailman joet on pumpattu niin täyteen lääkkeitä, että se uhkaa jo ympäristöä – "Teknologia ei yksin pysty ratkaisemaan ongelmaa". *Tekniikka & Talous*. saatavilla: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/tutkijat-varoittavat-maailman-joet-on-pumpattu-niin-tayteen-laakkeita-etta-se-uhkaa-jo-ymparistoa-teknologia-ei-yksin-pysty-ratkaisemaan-ongelmaa/31463167-9b38-32c6-b188-ab5052342593>. [viitattu: 14.11.2019].

*RIL* (2004). Vesihuolto II. Suomen rakennusinsinöörien liitto.

*RIL* (2003). Vesihuolto I. Suomen rakennusinsinöörien liitto.

*Robbiani Z.* (2013). Hydrothermal carbonization of biowaste/fecal sludge: Conception and construction of a HTC prototype research unit for developing countries Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

*Scheurer M., Sacher F. & Brauch H.* (2009). Occurrence of the antidiabetic drug metformin in sewage and surface waters in Germany. *Journal of Environmental Monitoring*. vol.11. no.9. pp.1608-1613.

*Setälä N.* (15.7.2019). Rovaniemellä koekäytetään uutta lietteenpolttolaitosta – menetelmä testissä ensimmäistä kertaa koko maailmassa. saatavilla: <https://www.talouselama.fi/uutiset/rovaniemella-koekaytetaan-uutta-lietteenpolttolaitosta-menetelma-testissa-ensimmaista-kertaa-koko-maailmassa/60b29b0e-21cc-411e-9e15-fa13db0ebcc3>. [viitattu: 10.12.2019].

*Suomen ympäristökeskus* (6.4.2017). Tuleeko lääkkeitä poistaa jätevesistä pakolliseksi? saatavilla: [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Uutiskirjeet/Vesikirje/Tuleeko\\_laakejaamien\\_poistaminen\\_jateves\(42678\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Uutiskirjeet/Vesikirje/Tuleeko_laakejaamien_poistaminen_jateves(42678)). [viitattu: 1.11.2019].

*Ternes T.A., Herrmann N., Bonerz M., Knacker T., Siegrist H. & Joss A.* (2004). A rapid method to measure the solid–water distribution coefficient (K<sub>d</sub>) for pharmaceuticals and musk fragrances in sewage sludge. *Water Research*. vol.38. no.19. pp.4075-4084.

*Tilastokeskus* (16.11.2018). Nuorten määrä uhkaa vähentyä huomattavasti syntyvyyden laskusta johtuen. saatavilla: [https://www.stat.fi/til/vaenn/2018/vaenn\\_2018-11-16\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/vaenn/2018/vaenn_2018-11-16_tie_001_fi.html). [viitattu: 14.11.2019].

*Törmänen E.* (6.4.2017). Jätevesissä on satoja kiloja särkylääkkeitä ja muita lääkeaineita – lääkkeitä poistaa vaikeaa. *Tekniikka & Talous*. saatavilla: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/jatevesissa-on-satoja-kiloja-sarkylaakkeita-ja-muita-laakeaineita-laakejaamien-poistaminen-vaikeaa/05cc2134-df0b-3224-8a49-1e49dbbda30f>. [viitattu: 14.11.2019].

*Tran N.H., Reinhard M. & Gin K.Y.* (2018). Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions-a review. *Water Research*. vol.133. pp.182-207.

*Trovó A.G., Nogueira R.F.P., Agüera A., Fernandez-Alba A.R., Sirtori C. & Malato S.* (2009). Degradation of sulfamethoxazole in water by solar photo-Fenton. Chemical and toxicological evaluation. *Water Research*. vol.43. no.16. pp.3922-3931.

*UNEP* (2004). General Technical Guideline on the Environmentally Sound Management of Wastes Consisting of, Containing or Contaminated with Persistent Organic Pollutants. Open-ended Working Group Report of the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal.

*Väisänen R.* (23.5.2019). Suomi saattoi ratkaista koko maailmaa piinaavan ongelman, jonka vuoksi kalat joutuvat käyttämään masennuslääkkeitä – mutta se maksaa. Yle. saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-10792721>. [viitattu: 14.11.2019].

*Vieno N.* (2015). Haitta-aineet puhdistamo- ja hajalietteissä. saatavilla: [http://www.vhvsy.fi/files/upload\\_pdf/5004/Julkaisu%2073\\_2015.pdf](http://www.vhvsy.fi/files/upload_pdf/5004/Julkaisu%2073_2015.pdf).

*Vieno N., Tuhkanen T. & Kronberg L.* (2007). Elimination of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Finland. *Water Research*. vol.41. no.5. pp.1001-1012.

*Vilpanen M. & Toivikko S.* (2017). Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus Suomen Vesilaitosyhdistys ry. saatavilla: [https://www.vvy.fi/site/assets/files/1621/yhdyskuntalietteen\\_ka\\_sittelyn\\_ja\\_hyo\\_dyntamisen\\_nykytilannekatsaus\\_26092017.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/1621/yhdyskuntalietteen_ka_sittelyn_ja_hyo_dyntamisen_nykytilannekatsaus_26092017.pdf).

*vom Eyser C., Palmu K., Schmidt T.C. & Tuerk J.* (2015). Pharmaceutical load in sewage sludge and biochar produced by hydrothermal carbonization. *Science of The Total Environment*. vol.537. pp.180-186.

*Weiner B., Baskyr I., Poerschmann J. & Kopinke F.* (2013). Potential of the hydrothermal carbonization process for the degradation of organic pollutants. *Chemosphere* 92. vol.92. no.6. pp.674-680.

*Ylivainio K., Jermakka J., Wikberg H. & Turtola E.* (2019). Lämpökemiallisen käsittelyn vaikutus jätevesilietefosforin lannoitusarvoon : Jätevesien fosfori kiertoon lannoitteeksi (PRecover) -hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 3/2019. Luonnonvarakeskus. pp.67 s.

*Yu J.T., Bouwer E.J. & Coelhan M.* (2006). Occurrence and biodegradability studies of selected pharmaceuticals and personal care products in sewage effluent. *Agricultural Water Management*. vol.86. no.1. pp.72-80.

*Yu Y. & Wu L.* (2012). Analysis of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals and personal care products in sewage sludge by gas chromatography–mass spectrometry. *Talanta*. vol.89. pp.258-263.

*Zhou W. & Moore D.E.* (1994). Photochemical decomposition of sulfamethoxazole. *International Journal of Pharmaceutics*. vol.110. no.1. pp.55-63.